

学校编码: 10384
学号: 19820111152862

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的制备及其特性研究

Fabrication and Characteristics of InGaN/GaN Multiple
Quantum Well Solar Cells

王 宇

指导教师姓名: 张保平教授

专 业 名 称: 光伏工程

论文提交日期: 2014 年 4 月

论文答辩时间: 2014 年 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 4 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为(厦门大学微纳光子研究室)课题(组)的研究成果,获得(张保平 教授)课题(组)经费或实验室的资助,在(厦门大学物理系)实验室完成。

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

- () 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。
- () 2. 不保密，适用上述授权。

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

作为第三代半导体材料，InGaN 凭借其优异的光伏特性，近年来已成为国际上关注的热点。In_xGa_{1-x}N 合金不仅具有连续可调的直接带隙结构(0.7~3.4 eV)，其吸收光谱几乎与太阳光谱完美匹配，还具有高吸收系数、高电子迁移率、高硬度、耐高温、抗辐射能力强等优点，是实现全光谱太阳能电池的理想材料，在高效太阳能电池方面展现出了巨大的发展潜力。本文以 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池为核心，在材料表征、器件制备、性能测试、极化效应对器件的影响等多方面进行了细致深入的研究工作，主要研究成果包括以下几个方面：

(1) 制作了 In 组分为 0.2 的 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池，将电池的光谱响应拓展到 475nm 并获得了良好的光电响应特性，峰值内外量子效率分别为 16.5%和 33.2%。器件的整体性能较佳，开路电压(V_{oc})、短路电流(J_{sc})、填充因子(FF)及转换效率(η)分别为 2.16 V、0.55 mA/cm²、60.1%和 0.64%。

(2) 研究了 In_{0.2}Ga_{0.8}N/GaN 多量子阱太阳能电池的光电特性。高分辨率 X 射线衍射(HRXRD)及原子力显微镜(AFM)的测试结果显示，多量子阱结构的界面清晰、周期性良好，是器件开路电压较高的主要原因。器件的反射、透射和吸收谱显示，量子阱的吸收边位于 475 nm 左右。结合器件外量子效率谱的测试结果，我们发现较薄的吸收层厚度会导致器件对入射光的吸收不充分，进而影响了器件短路电流和光谱响应。器件 I-V 测量结果表明，p 型接触引起的器件的串联电阻增大也是影响器件短路电流和填充因子的重要原因。此外，电池外延片材料质量的多项表征及反向暗电流的测试的结果还显示，材料内部的 V 型缺陷和螺位错也是影响器件性能的重要因素，提高材料质量是关键。

(3) 分析了极化效应对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池特性的影响。在原有太阳能电池测试系统的基础上加入了可调衰减片，不同聚光度下器件的 I-V 特性曲线及外量子效率谱的分析结果表明，极化效应是引起器件 I-V 曲线产生拐点的主要原因之一并影响着拐点的位置。随着极化程度的加剧，器件的串联电阻增大，填充因子减小，拐点逐渐往高电压方向移动。通过对不同偏压下外量子效率谱的分析，发现极化效应引起量子阱有源区内净电场减小甚至反转，不利于光生载

流子的有效收集；量子阱能带发生倾斜并产生了附加势垒，严重阻碍了光生载流子的输运，导致器件的外量子效率下降。通过实验测试和理论计算的对比分析，提出极化效应引起光生载流子收集效率下降，增大了光生载流子在收集过程中发生非辐射复合的几率，导致反向饱和电流增大，开路电压下降。改善极化效应对于提升 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的性能至关重要。

关键词：InGaN；多量子阱(MQWs)；太阳能电池；极化效应

Abstract

As the third generation semiconductor material, the InGaN alloy has become a hot research field internationally due to its excellent photovoltaic properties recently. The $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ alloy has many advantages such as tunable energy bandgap from 0.7eV (InN) to 3.4eV (GaN) (which cover almost the whole solar spectrum), high absorption coefficient, high electron mobility, high hardness, excellent temperature and radiation resistance, which make InGaN the ideal material for realizing full spectrum solar cells and offer broad application prospects for high efficiency solar cells. The present study concentrates on InGaN/GaN multiple quantum well solar cells and systematically investigates the characterization of the epitaxial material, device fabrication, performance characterization of the device and the impacts of polarization effect, etc. The main results were summarized as follows:

(1) The fabricated $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}$ MQWs solar cells with spectrum reponse extending out to 475 nm showed excellent photoelectric response characteristics and performance. The open circuit voltage(V_{oc}), short circuit current(J_{sc}), fill factor(FF) ,peak external efficiency(EQE), peak internal efficiency(IQE) and conversion efficiency(η) of the devices were 2.16V, 0.55mA/cm², 60.1%, 16.5%, 33.2% and 0.64%, respectively.

(2) The optical and electrical properties of InGaN/GaN MQWs solar cells were investigated. The results of HDXRD and AFM showed that the interfaces between wells and barriers were clear and the entire MQWs region remained good periodicity. It was proposed that the high V_{oc} could be ascribed to good overall quality of InGaN/GaN MQWs. The reflection, transmission and absorption spectrum of the devices showed that the absorption edge was nearly 475nm. Combined with the EQE spectrum, we proposed that the absorption layer was not thick enough to absorp all the incident lights, which could affect the J_{sc} and spectral response of the devices. Based on the I-V curve of the devices, it was proposed that p-type contact could

increase the series resistance of the devices, which could influence the J_{sc} and FF. Based on the results of various characterization techniques of the material and the reverse dark current test, we presented that the V-shaped defects and the screw dislocations of the material was also an important factor affecting the device performance and the key is to improve the material quality.

(3) The impacts of polarization effect on InGaN/GaN MQWs solar cells were investigated. An adjustable attenuator was added to the original test system of solar cells. According to the analysis of the I-V curve and EQE spectrum under different concentration conditions, we presented that the polarization effect of InGaN/GaN MQWs was one of the main causes of the “turning point” in I-V curve and could affect its position. As the polarization effect strengthened, the series resistance increased and the FF decreased, the turning point would gradually shift toward the high-voltage area. Through the analysis of the EQE spectra under different applied voltages, it was convinced that the polarization induced electric fields across the MQW active region which was in the opposite direction of the depletion field resulting in a reduction or even a reversal of the net electric field. The energy band of the MQWs tilted and resulted in additional barriers which dramatically reduced carrier collection, leading to the decrease of EQE. By comparing the theoretical and experimental results, it can be found that the nonradiation recombination rate of the carriers was increased by the polarization effect and resulted in an increase of the reverse saturation current, leading to the drop of V_{oc} . It is of great importance to reduce the influence of polarization effect for improving the performance of InGaN/GaN MQWs solar cells.

Keywords: InGaN; Multiple quantum wells (MQWs); solar cell; polarization effect.

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 太阳能电池的发展历史.....	1
1.1.2 InGaN 太阳能电池的研究意义.....	4
1.1.3 InGaN 太阳能电池的研究进展.....	6
1.1.4 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的特点.....	7
1.2 InGaN 太阳能电池存在的问题及挑战.....	9
1.2.1 高 In 组分 InGaN 材料的生长.....	9
1.2.2 极化效应的影响.....	10
1.2.3 p 型掺杂及欧姆接触.....	11
1.3 本论文的研究内容与结构安排.....	11
参考文献.....	12
第二章 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池研究基础.....	18
2.1 太阳能电池基本原理.....	18
2.1.1 太阳能电池的基本工作原理.....	18
2.1.2 太阳能电池的光电特性及主要表征参数.....	20
2.2 InGaN 材料的生长技术及表征方法.....	25
2.2.1 MOCVD 生长技术.....	25
2.2.2 InGaN 材料的光电特性表征方法.....	27
2.3 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池制备工艺的主要设备及测试方法.....	31
2.3.1 太阳能电池制备工艺主要设备.....	31
2.3.4 测试系统及测试方法.....	34
2.4 本章小结.....	36
参考文献.....	36
第三章 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的制备及特性分析.....	38

3.1 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池材料及光学特性分析.....	38
3.2 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的制备.....	43
3.3 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池的性能分析.....	45
3.5 本章小结.....	51
参考文献.....	52
第四章 极化效应对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池特性的影响 ...	56
4.1 III 族氮化物材料中的极化效应.....	56
4.1.1 极化产生的原因.....	56
4.1.2 自发极化与压电极化.....	58
4.1.3 极化效应的计算.....	59
4.2 极化效应对器件的影响.....	61
4.2.1 测试原理及方法.....	61
4.2.2 极化效应对 InGaN/GaN 多量子阱太阳能电池特性的影响.....	64
4.3 本章小结.....	76
参考文献.....	76
第五章 结论与展望	81
硕士期间发表的论文	84
致谢	84

TABLE OF CONTENTS

Chapter I Introduction	1
1.1 Research Background and Significance	1
1.1.1 Developments of Solar Cells	1
1.1.2 Research significance of InGaN Solar Cells	4
1.1.3 Research Progress of InGaN Solar Cells	6
1.1.4 The Characteristics of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	7
1.2 Problems and Challenges of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	9
1.2.1 Growth of High In Content InGaN	9
1.2.2 Influences of Polarization Effect	10
1.2.3 P-type Doping and Ohmic Contacts	11
1.3 Main Works and Structural Arrangement	11
References	12
Chapter II The Basics of InGaN/GaN MQWs Solar Cells Research	18
2.1 Fundamentals of Solar Cells	18
2.1.1 Working Principle	18
2.1.2 Photoelectric Characteristics & Main Characterization Parameters	20
2.2 Growth and Characterization Techniques of InGaN	25
2.2.1 MOCVD Technique	25
2.2.2 Approaches to Photoelectric Characterization of InGaN	27
2.3 Fabrication Equipments and Testing Methods of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	31
2.3.1 Fabrication Equipments	31
2.3.4 Testing System & Methods	34
2.4 Concluding Remarks	36
References	36
Chapter III Fabrication and Characteristic Analysis of InGaN/GaN MQWs Solar Cells	38

3.1 Structural and Optical Analysis of InGaN/GaN MQWs Solar Cells.....	38
3.2 Fabrication of InGaN/GaN MQWs Solar Cells.....	43
3.3 Performance Analysis of InGaN/GaN MQWs Solar Cells.....	45
3.5 Concluding Remarks.....	51
References.....	52
 Chapter IV Influence of Polarization Effect on Characterization of	
InGaN/GaN MQWs Solar Cells.....	56
4.1 Polarization Effect of Group III Nitride Materials.....	56
4.1.1 Causes of Polarization Effect.....	56
4.1.2 Spontaneous & Piezoelectric Polarizations.....	58
4.1.3 Calculation of Polarization Effect.....	59
4.2 Influence of Polarization Effect.....	61
4.2.1 Testing Principle & Method.....	61
4.2.2 Influence of Polarization Effect on Characterization of InGaN/GaN	
MQWs Solar Cells.....	64
4.3 Concluding Remarks.....	76
References.....	76
 Chapter V Conclusions & Prospects.....	81
Achievements.....	84
Acknowledgements.....	84

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

近年来，为了应对全球范围内的能源危机的不断加剧和环境问题的日益恶化，提高现有能源的使用效率，减少环境污染，积极地开发各种可再生的新能源刻不容缓。作为一种易获取、可再生且安全的绿色能源，太阳能已经逐渐从众多新能源中脱颖而出，受到越来越多国家的重视。由于与现有的电力技术完全兼容，同时具有很高的安全保障性，太阳能在能源结构中的比例正在逐年扩大，并将在未来的能源结构中占据主导地位。太阳能的利用方式主要有光热利用、光电利用、光化学利用以及光生物利用等。其中，太阳能光伏发电由于不受太阳辐射方式和地域限制，成为了最广泛的应用方式。太阳能电池是一种以半导体光生伏特效应为基础，将太阳辐射能直接转换为电能的光电子器件，随着生产规模和研发投入不断扩大，太阳能取代传统能源成为人类社会主要能源指日可待。

一直以来，研究者们都在致力寻找新材料、研发高转换效率的太阳能电池。作为第三代半导体材料，InGaN 凭借其优异的光伏特性，在实现高效太阳能电池和全光谱太阳能电池方面展现出了巨大的发展潜力，近年来迅速成为业界关注的热点。随着材料生长技术的突破、工艺水平的进步以及聚光技术的发展，相信在不远的将来，InGaN 太阳能电池将拥有更广阔的应用空间。

1.1.1 太阳能电池的发展历史

太阳能电池的工作原理基于半导体的光伏效应。1839 年，法国科学家 Becquerel 观察到浸在电解液中的电极之间有光致电压，第一次提出了光伏效应的概念。1876 年，英国科学家 Adams 和 Day 也在硒的全固态系统中发现了光生电流，这是首次在固体中观察到光伏效应。随后，研发了以硒和氧化亚铜为材料的光电池，但是转换效率非常低，只能用于光电探测。1905 年，Albert Einstein 发表了关于光电效应的论文(后获得诺贝尔物理学奖)，为光电效应奠定了理论基础。1954 年，美国贝尔实验室的 Chapin、Fuller 和 Pearson 研制出了真正意义上

的第一块硅太阳能电池^[1]，其转换效率为 6%，并很快提高到了 10%。它是第一个能以适当效率将光能转换为电能的光伏器件，这是太阳能电池发展史上重要的里程碑，从此拉开了现代太阳能电池研究、开发和应用的序幕。

20 世纪 60 年代初，供空间应用的电池设计已经成熟，在此后的十多年里，太阳能电池主要用于空间技术^[2]，包括人造卫星、航天飞机和空间站等在内的几乎所有的太空飞行器，都采用太阳能电池作为主要供电方式。航空航天事业的蓬勃发展极大地推进了太阳能电池材料和器件加工技术的进步和产业的发展。

20 世纪 70 年代初，硅电池的发展经历了一个革新的阶段，能量转换效率得到了显著的提升，同时，太阳能电池的地面应用开始逐渐兴起。20 世纪 70 年代末，太阳能电池的地面应用数量已经超过了空间应用。随着产量的逐年增加，成本也开始下降。

20 世纪 80 年代初，光伏工业开始逐渐成熟，出现了一系列新工艺，各种类型的电池效率开始不断提升，如单晶硅太阳能电池效率达 20%，多晶硅电池效率达到 14.5%，砷化镓电池效率达到 22.5%，硫化镉电池效率达到 9.15%。在欧洲、美洲和日本，出现了许多制造太阳能电池设备的公司，推动了产业化进程。同时，为了扩大产率和降低成本，大容量实用电站纷纷建立，显示了光伏应用的广阔前景。然而，由于尚处于发展初期，缺乏资金支持，光伏产业的发展也遇到了很多困难。

到了 20 世纪 90 年代，由于太阳能电池成本的持续降低及光伏并网发电的施行，建立分布式太阳能电站已经成为可能。与居民住宅屋顶相结合的独立式太阳能并网发电系统也开始崭露头角。美国、日本及欧洲等国先后制定了太阳能发展计划，为太阳能电池的研发提供资金及相关的产业扶持政策^[3]。各种世界太阳能发展规划和国际太阳能公约的制定、国际太阳能基金的设立都推动了全球太阳能技术的开发和应用。

进入 21 世纪以来，各种新概念的提出，新材料、新技术的开发应用为光伏产业的发展前景提供了更为灿烂的明天。

2001 年，澳大利亚新南威尔士大学的 Marting Green 提出了将太阳能电池的发展划分为三个阶段^[4]。

第一代太阳能电池：主要是晶体硅太阳能电池，包括单晶硅太阳能电池、多

晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池。从 1954 年发展到现在已经经历了半个多世纪,虽然是最早一代的太阳能电池,转换效率较低,但因其技术成熟且成本低廉,目前仍然是应用最广泛的太阳能电池,约占太阳能电池整体产量的 90%。目前,单晶硅太阳能电池效率的最高纪录为 27.4%,由澳大利亚新南威尔士大学 M. Green 研究小组从 1999 年一直保持至今^[5]。

第二代太阳能电池:主要是薄膜太阳能电池,包括非晶硅薄膜、微晶硅薄膜、硫化镉(CdS)、碲化镉(CdTe)、铜铟硒(CIS)、铜铟镓硒(CIGS)、砷化镓(GaAs)薄膜太阳能电池和染料敏化太阳能电池等。薄膜太阳能电池的厚度比第一代太阳能薄得多,如非晶硅薄膜太阳能电池膜厚只有 $1\mu\text{m}$,是晶体硅太阳能电池厚度的 1/100,故可以节约大量的原材料,易于实现大面积生产。并且,薄膜太阳能电池可以在便宜的玻璃、塑料、石墨、陶瓷等材料基板上制造,大大降低了制造成本。2000 年以后,薄膜太阳能电池的效率处于缓慢上升的状态,目前转换效率的最高纪录为 CIGS 薄膜电池的 20.4%。

第三代太阳能电池:主要是各种新型太阳能电池,包括多结太阳能电池、多带隙太阳能电池、热载流子太阳能电池、热光伏太阳能电池、多激子产生太阳能电池、光化学太阳能电池、高分子太阳能电池等。目前,第三代太阳能电池还处于实验室研究阶段,其主要特点是薄膜化、转换效率高,原料丰富且无毒。进入 21 世纪以来,单晶硅电池的效率长期增长缓慢,最高纪录徘徊在 25%左右停滞不前。澳大利亚新南威尔士大学的 Marting Green 提出了“第三代”或“下一代”太阳能电池的理念,即通过设计新概念的太阳能电池、使用新型材料和研发新制造技术来实现太阳能电池的高效率。第三代太阳能电池属于最前沿的研究,一旦取得突破,将是太阳能电池发展史上又一重要的里程碑。

图 1.1 是美国可再生能源实验室(NERL)提供的各类型太阳能电池的最高效率纪录图。目前,第三代太阳能电池的最高纪录由美国的 Solar Junction 于 2012 年创造,他们制作的多结聚光太阳能电池在 947 倍太阳光照下的转换效率高达 44%;而在非聚光条件下,双节和三节以上太阳能电池的最高转换效率分别为美国的 Alta Devices 和 Boeing Spectrolab 的 30.8%和 37.8%。

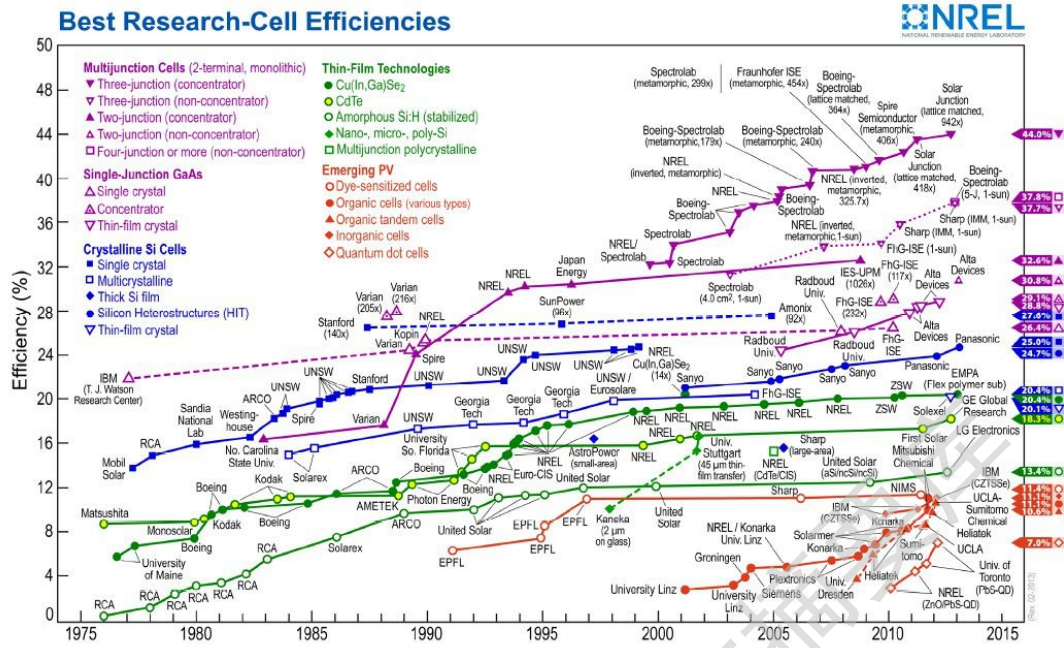


图 1.1 美国可再生能源实验室(NERL)提供的各种太阳能电池最高效率记录图^[7]

为了扩大太阳能的应用，增强其与常规能源的竞争力，高效率 and 低成本的太阳能电池和材料是人们一直以来追求的目标。随着新材料、新技术的不断涌现，以及太阳能电池制作工艺水平的不断提升，太阳能电池的制造成本将会不断下降，效率将会不断提升，应用范围也将持续扩大，最终成为具有更强竞争力的重要新能源。“寻找新材料，开发新技术，开拓新领域”是太阳能电池发展历史的启示^[6]。

1.1.2 InGaN 太阳能电池的研究意义

作为一种新型的 III-V 族太阳能电池，InGaN 太阳能电池凭借其优越的光伏性能，在实现高效太阳能电池和全光谱太阳能电池方面展现出了巨大的发展潜力。虽然与其他种类的 III-V 族太阳能电池相比，InGaN 太阳能电池的研究还相对较少，尚处于起步阶段，但近几年来发展迅猛，已经逐渐成为了国内外研究的一个新热点，受到越来越多研究者的关注。

2002 年，俄罗斯的 Davydov 等人^[8,9]，美国 Berkeley 的 Wu 等人^[10]，以及日本 NTT 研究室的 Matsuoka 等人^[11]对 InN 的禁带宽度进行了重新修正。修正后的 InN 的真实带隙约为 0.65eV，而非之前 Tansley 报道的 1.9eV^[12]。通过改变 In 的

组分, 就可以实现 InGaN 带隙在 3.4eV (GaN) 到 0.65eV (InN) 内连续可调, 其光谱吸收范围从紫外波段的 365nm 一直延伸至红外波段的 1770nm, 几乎覆盖了整个太阳光谱, 如图 1.2 所示。与其他体系的材料相比, InGaN 更符合多结太阳能电池对材料带隙的严格要求, 这为实现高效率的多结太阳能电池提供了可能。由于 InN 和 GaN 均为直接带隙材料, InGaN 在整个 In 组分范围内也为直接带隙材料, 这使得 InGaN 具有较高的吸收系数和光吸收效率。1997 年 Muth 等人^[13]报道了 InGaN 的带隙边缘吸收系数高达 10^5cm^{-1} , 这意味着 400nm 左右的 InGaN 材料就可以吸收 98% 以上的入射光。这有利于节省材料降低成本, 减轻电池重量, 对于航空工业尤为重要。InGaN 材料还具有较高的电子迁移率^[14], 可以降低光生载流子在材料内部的复合几率, 使其能够快速到达外电路, 有利于提高电池的短路电流。此外, InGaN 材料的抗辐射能力很强, 并且对温度变化不敏感^[15]。有研究表明, 在高能粒子轰击后, InGaN 的光电特性并没有明显的变化, 这使得 InGaN 成为制作空间太阳能电池的理想材料。

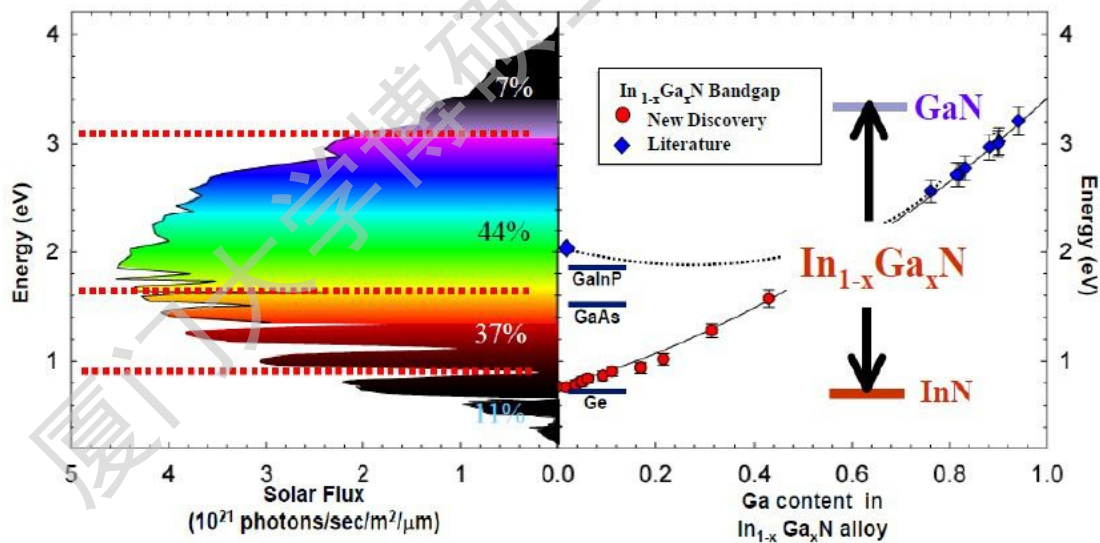


图 1.2 In_{1-x}Ga_xN 材料带隙对应的太阳光谱覆盖范围

研究表明, 在标准太阳光条件下, 单结 InGaN 太阳能电池的转换效率可达 30% 以上^[16], 而双结转换效率则高达 50% 左右^[17]。尽管研究时间不长, 并且受到高昂成本的限制, 但 InGaN 太阳能电池的优势已经逐渐受到人们的认可, 展现出巨大的发展潜力。InGaN 太阳能电池的发展前景主要体现在以下几个方面:

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”. Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库